



УДК 621.3
doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-17



Open
Access

RESEARCH
ARTICLE

Сравнение схем электроснабжения по параметрам надежности

Владислав Юрьевич Кирилин

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
robika2000@lenta.ru

Светлана Николаевна Медведева

Пензенский государственный университет, Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40
sn-medvedeva@yandex.ru

Аннотация. Надежность энергосистем и ее элементов характеризуется такими параметрами, как вероятность безотказной работы, вероятность отказа, интенсивность отказов, время наработки до отказа и др. Самым ненадежным элементом являются линии электропередачи. Проведена сравнительная оценка параметра потоков отказов для линий электропередачи простейших радиальных и кольцевой схем.

Ключевые слова: линия электропередачи, параметр потока отказов, интенсивность отказов, радиальная схема электроснабжения, кольцевая схема электроснабжения

Для цитирования: Кирилин В. Ю., Медведева С. Н. Сравнение схем электроснабжения по параметрам надежности // Инжиниринг и технологии. 2024. Т. 9 (2). С. 1–5. doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-17

Comparison of power supply schemes by reliability parameters

Vladislav Yu. Kirilin

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
robika2000@lenta.ru

Svetlana N. Medvedeva

Penza State University, 40 Krasnaya Street, Penza, Russia
sn-medvedeva@yandex.ru

Abstract. The reliability of power systems and its elements is characterized by such parameters as the probability of trouble-free operation, the probability of failure, failure rate, operating time to failure, etc. The most unreliable element is the power lines. A comparative assessment of the failure flow parameter for power transmission lines of the simplest radial and annular circuits.

Keywords: power transmission line, failure flow parameter, failure rate, radial power supply circuit, ring power supply circuit

For citation: Kirilin V.Yu., Medvedeva S.N. Comparison of power supply schemes by reliability parameters. *Inzhiniring i tekhnologii = Engineering and Technology*. 2024;9(2):1–5. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2024-9-2-17

Показателями надежности являются вероятность работоспособного состояния сети или вероятность ее отказа, параметр потока отказов или при простейшем потоке интенсивность отказов, временные показатели: среднее время безотказной работы, среднее время восстановления [1].

Рассмотрим простой вероятностный метод расчета надежности по средним значениям характеристик отказов элементов схемы. Причем самым ненадежным элементом в электроэнергетической системе являются линии электропередач (ЛЭП), как видно из табл. [2]. Для воздушных и кабельных ЛЭП интенсивность отказов дана на 1 км длины линий, поэтому, если даже длина воздушной ЛЭП 10 км, интенсивность надо умножить на 10.



Таблица

Параметры надежности элементов электроэнергетических систем

Элемент	Интенсивность отказов, λ_0 , [1/(год)], [1/(км·год)]	Среднее время восстановления, $t_{в}$, [ч]	Параметр потока преднамеренных отключений элементов сети $\lambda_{п}$, [1/год]	Время преднамеренного отключения элементов сети $t_{п}$, [ч]
ЛЭП (на 1 км)	0,018–0,023	30	2,2	32
кабельные линии	0,6–0,8	10–12	0,5	4–6
выключатели	0,02–0,066	10–15	1–3,5	10–32
разъединители	0,008–0,015	6–14	0,2–0,5	4–8
трансформаторы	0,01–0,016	80–280	0,3–0,33	30–110

Таким образом, надежность работы системы в целом будет определять в первую очередь надежность работы ЛЭП. Зачастую в качестве оптимальной схемы электроснабжения выбирают комбинированную схему, где есть как радиальные, так и кольцевые цепи электроснабжения.

Радиальная схема представляет собой схему, в которой ЛЭП соединяет источник питания с приемником электроэнергии без промежуточных отборов мощности.

Достоинства такой схемы:

- 1) максимальная простота;
- 2) аварийное отключение радиальной линии не отражается на электроснабжении остальных потребителей;
- 3) возможность обеспечения селективной защиты.

Недостатки схемы:

- 1) большая длина линий, из-за чего большой расход цветного металла и, следовательно, высокая стоимость системы;
- 2) невысокая надежность электроснабжения.

Кольцевая схема электропитания представляет собой замкнутый контур, который начинается и заканчивается на одной системе шин.

Достоинства кольцевой схемы:

- 1) высокая надежность системы электроснабжения;
- 2) универсальность и гибкость схемы (малое изменение сети при изменении расположения технологического оборудования);
- 3) меньшие потери электроэнергии.

Недостатки схемы:

- 1) трудность в обеспечении селективности защиты;
- 2) более сложный выбор оборудования, устанавливаемого в кольце, так как ток, протекающий по аппаратам, меняется.

Таким образом, в плане надежности электроснабжения кольцевая схема лучше. Покажем это.

Возьмем самый простой вариант схемы электроснабжения: 1 источник и 2 потребителя, и рассмотрим 2 варианта систем электроснабжения: радиальный и кольцевой.

Интенсивность отказов ЛЭП примем средней $\lambda = 0,02$ 1/(год·км). Расстояния от источника до потребителей пусть будут 10 км (рис. 1).

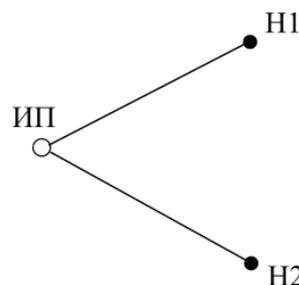


Рис. 1

Для радиальной схемы электроснабжения, если потребители 3-й категории электроснабжения, параметр потока отказов определяется по формуле



$$\omega_{\text{н1_н2}} = \lambda \cdot L = 0,02 \cdot 10 = 0,2$$

или 2 отказа за 10 лет по каждой ЛЭП.

Вероятность вынужденного простоя линии из-за аварий

$$q_{\text{л1_л2}} = \frac{\omega \cdot t_{\text{вл2}} \cdot L}{8760} = \frac{0,02 \cdot 30 \cdot 10}{8760} \approx 6,85 \cdot 10^{-4}.$$

При выводе в ремонт ЛЭП электроснабжение узлов нагрузки прерывается на время преднамеренного отключения $t_{\text{п}}$, причем это время больше суток. Параметр потока отказов ЛЭП при отказе от ремонта будет

$$\omega_{\text{н1_н2}} = \lambda_{\text{п}} \cdot L = 2,2 \cdot 10 = 22 \text{ отказа в год,}$$

а вероятность отказа ЛЭП без преднамеренного отключения

$$q_{\text{п_н1_н2}} = \frac{\lambda_{\text{п}} \cdot t_{\text{п}} \cdot L}{8760} = \frac{2,2 \cdot 32 \cdot 10}{8760} \approx 0,08.$$

Если потребители 2-й категории, то ЛЭП резервируются.

В системах с резервированием элементов параметр потока отказов для некоторой нагрузки определяется, исходя из формулы:

$$\omega_{\text{н}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \left[\prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (\omega_j t_{\text{в}j} + \omega_{\text{п}j} t_{\text{п}j}) \right], \quad (1)$$

где

- ω_i – параметр потока отказов по одной из резервированных цепей;
 - ω_j – параметр потока отказов по второй из резервированных цепей;
 - $\omega_{\text{п}j}$ – параметр потока отказов по второй из резервированных цепей при ее преднамеренном отключении;
 - $t_{\text{в}j}$ – время восстановления после аварии по второй из резервированных цепей;
 - $t_{\text{п}j}$ – время преднамеренного отключения элементов сети по второй из резервированных цепей.
- Так как время восстановления/время преднамеренного отключения определяется

$$t_{\text{в_п}} = \frac{8760 \cdot q_{\text{в_п}}}{\omega_{\text{в_п}}} \text{ [час]},$$

то формулу (1) можно видоизменить (рис. 2)

$$\omega_{\text{н}} = \sum_{i=1}^n \omega_i \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (q_j + q_{\text{п}j}), \quad (2)$$

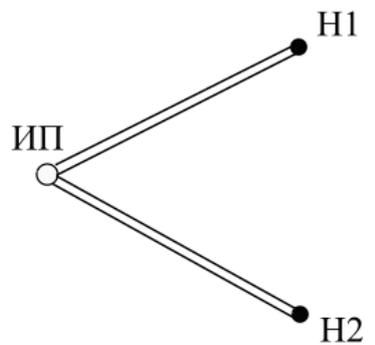


Рис. 2

и в случае двух параллельных элементов без учета их преднамеренных отключений:



$$\omega_n = \omega_1 q_2 + \omega_2 q_1.$$

Для двухцепных ЛЭП при отказе одной цепи условную вероятность отказа второй цепи примем равной 0,1 [3]. Тогда вероятность отказа двух цепей будет равна 0,02. Для 2 потребителей при равных расстояниях от источника до потребителей параметр потока отказов определится, как

$$\omega_{n1} = \omega_{n2} = 2 \cdot 0,02 = 0,04$$

или 4 отказа за 100 лет для каждого потребителя.

При выводе в ремонт одной из ЛЭП вторая остается в работе, следовательно, электроснабжение узлов нагрузки не прерывается. С учетом преднамеренных отключений параметр потока отказов для двух параллельных элементов определяется:

$$\omega_n = \omega_1 (q_2 + q_{n2}) + \omega_2 (q_1 + q_{n1}).$$

Для нашего случая параметр потока отказов во время ремонта равен

$$\omega_{n1_n2} = 2 \cdot 0,2 \cdot (0,1 + 0,08) = 0,072$$

или примерно 7 отказов за 100 лет для каждого потребителя.

В схеме с резервированием цепей электроснабжения параметр потока отказов уменьшился в 5 раз, и при преднамеренных отключениях в 305 раз.

Рассмотрим теперь кольцевую схему с теми же параметрами, и треугольник соединений пусть будет равносторонний (рис. 3).

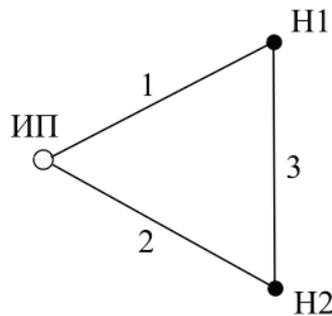


Рис. 3

Расчет ведется также по формуле (2). Причем в этой схеме линии независимые друг от друга.

Параметр потока отказов как для первого, так и для второго потребителя без учета их преднамеренных отключений:

$$\begin{aligned} \omega_{n1} = \omega_{n2} &= \omega_1 (q_2 + q_3) + (\omega_2 + \omega_3) q_1 = \\ &= 0,2 \cdot 2 \cdot 6,85 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 0,2 \cdot 6,85 \cdot 10^{-4} = 5,48 \cdot 10^{-4} \end{aligned}$$

с учетом преднамеренных отключений линий:

$$\begin{aligned} \omega_{n1} = \omega_{n2} &= \omega_1 (q_2 + q_{n2} + q_3 + q_{n3}) + (\omega_2 + \omega_3) (q_1 + q_{n1}) = \\ &= 0,2 \cdot 2 \cdot (6,85 \cdot 10^{-4} + 0,08) + 2 \cdot 0,2 \cdot (6,85 \cdot 10^{-4} + 0,08) \approx 0,065 \end{aligned}$$

Для кольцевой схемы параметр потока отказов по сравнению с резервированной схемой уменьшился более чем в 70 раз, а с учетом преднамеренных отключений практически не изменился.

Подытожим:

1. Кольцевая схема более надежна по сравнению с радиальной резервированной схемой за счет того, что в кольцевой схеме ЛЭП одноцепные и нарушения в электроснабжении по одной линии не скажутся на другие.

2. При выводе ЛЭП в ремонт параметр потока отказов в кольцевой схеме незначительно выше, чем в радиальной резервированной, потому что в этой ситуации оставшаяся в работе линия будет работать с тем же параметром потока отказов.



3. Кольцевая схема позволяет использовать меньшее количество кабеля и оборудования, чем радиальная резервированная схема, что позволяет снизить затраты на строительство и эксплуатацию электрической сети.

Список литературы

1. Бережкова Д. В., Медведева С. Н. К вопросу надежности элементов альтернативной энергетики // Инжиниринг и технологии. 2022. Т. 7 (2). С. 1–4. doi: 10.21685/2587-7704-2022-7-2-10
2. Волков Н. Г., Сивков А. А. Исследование надежности систем электроснабжения предприятий : метод. указания к выполнению лабораторных работ по курсу «Надежность электроснабжения» для студентов V курса, обучающихся по специальности 140211 «Электроснабжение» направления 140200 «Электроэнергетика». Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. 23 с. URL: <https://studfile.net/preview/4244136/>
3. Савина Н. В. Надежность систем электроэнергетики : учеб. пособие. Благовещенск, 2011. 268 с. URL: https://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3060.pdf

References

1. Berezhkova D.V., Medvedeva S.N. On the issue of reliability of alternative energy elements. *Inzhiniring i tehnologii = Engineering and technology*. 2022;7(2):1–4. (In Russ.). doi: 10.21685/2587-7704-2022-7-2-10
2. Volkov N.G., Sivkov A.A. *Issledovanie nadezhnosti sistem jelectrosnabzhenija predpriyatij: metod. ukazaniya k vypolneniju laboratornyh rabot po kursu «Nadezhnost' jelectrosnabzhenija» dlja studentov V kursa, obuchajushhihsja po special'nosti 140211 «Jelectrosnabzhenie» napravlenija 140200 «Jelectrojenergetika» = Research of reliability of power supply systems of enterprises: method. instructions for performing laboratory work on the course "Reliability of power supply" for V-year students studying in specialty 140211 "Power supply" direction 140200 "Electric Power Industry"*. Tomsk: Izd-vo Tomskogo politehnicheskogo universiteta, 2009:23. (In Russ.). Available at: <https://studfile.net/preview/4244136/>
3. Savina N.V. *Nadezhnost' sistem jelectrojenergetiki: ucheb. posobie = Reliability of electric power systems : studies. stipend*. Blagoveshhensk, 2011:268. (In Russ.). Available at: https://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/3060.pdf

Поступила в редакцию / Received 15.02.2024

Принята к публикации / Accepted 15.03.2024